

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ**  
**РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ №1:**  
**«ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КАДАСТР ВОДОТОКА»**

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА**

- расход 50% обеспеченности, соответствующий условиям средневодного года, для начала ( $Q_i$ ) и конца ( $Q_{i+1}$ )  $i$ -го участка водотока;

- отметки сухого дна начала ( $\Delta_j$ ) и конца ( $\Delta_{j+1}$ )  $i$ -го участка.

- расстояние от начала реки до  $i$ -ого створа  $L_i$ .

Расстояние от истока (0-й створ) до  $i$ -го створа

Номер створа	1	2	3	4	5
$L_i$ , км	3	5	6	4	7

Вариант 1

Номер створа	$\Delta_j$ , м	$Q_j$ , м <sup>3</sup> /с
1	5500	10
2	5000	30
3	2000	40
4	1000	50
5	0	55

Вариант 2

Номер створа	$\Delta_j$ , м	$Q_j$ , м <sup>3</sup> /с
1	2600	10
2	1600	15
3	1100	25
4	600	30
5	100	40

Вариант 3

Номер створа	$\Delta_j$ , м	$Q_j$ , м <sup>3</sup> /с
1	4000	20
2	3000	30
3	1500	50
4	1000	55

5	0	60
---	---	----

Вариант 4

Номер створа	$\Delta_j, \text{м}$	$Q_j, \text{м}^3/\text{с}$
1	3200	10
2	2200	50
3	1200	90
4	700	100
5	200	110

Вариант 5

Номер створа	$\Delta_j, \text{м}$	$Q_j, \text{м}^3/\text{с}$
1	4200	10
2	3200	20
3	2200	100
4	1200	150
5	200	200

Вариант 6

Номер створа	$\Delta_j, \text{м}$	$Q_j, \text{м}^3/\text{с}$
1	4000	10
2	3000	20
3	1500	50
4	1000	100
5	0	200

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЗАДАНИЮ

### 1. Методика расчета водно-энергетического кадастра реки

Рассмотрим реку от истока до места впадения – устье. Для определения теоретического (валового) потенциала реку разбивают на *створы* – поперечное сечение русла реки. Границы створов соответствуют местам изломов профиля водотока или местам впадения притоков. Рассмотрим один из участков реки – от створа 1 до створа 2 (см.рис. 1).

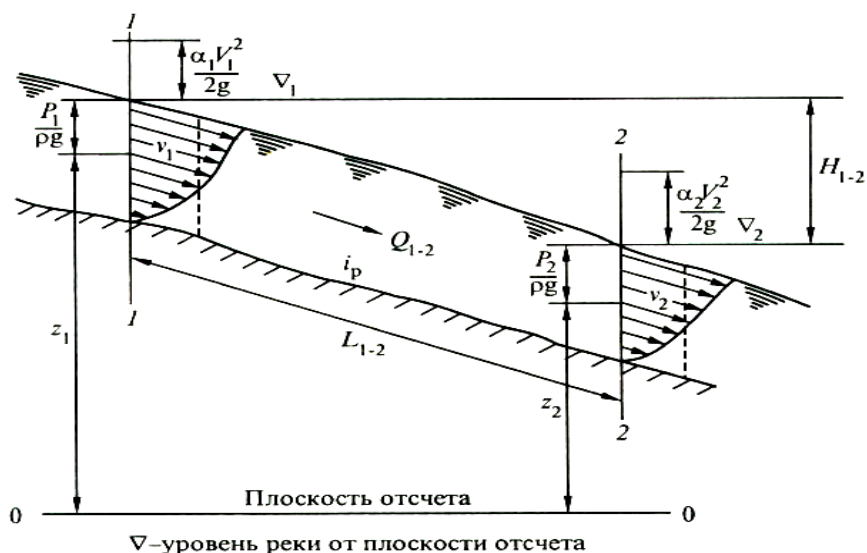


Рис. 1 - Схема разбиения водотока на створы

Методика расчета валового потенциала участка водотока базируется на уравнении Бернулли, согласно которому полная энергия  $\mathcal{E}$  потока жидкости объемом  $W$  ( $\text{м}^3$ ) в створах 1-1 и 2-2 (см.рис.1) будет равна:

$$\mathcal{E}_1 = \left( z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right) \cdot W \cdot \rho \cdot g, \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_2 = \left( z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} \right) \cdot W \cdot \rho \cdot g, \quad (2)$$

где  $z$  (м) - удельная потенциальная энергия положения, измеряемая высотой расположения центра тяжести живого сечения водотока над некоторой заданной или принятой плоскостью сравнения;  $P/\rho g$  (м) - удельная потенциальная энергия давления в точке центра тяжести живого сечения водотока при избыточном давлении в этой точке;  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) - плотность жидкости;  $g$  ( $\text{м}/\text{с}^2$ ) - ускорение свободного падения. Для водотоков с открытой водной поверхностью величина  $P/\rho g$  измеряется глубиной погружения данной

точки (в м) под свободную поверхность воды;  $\alpha V^2/2g$  - удельная кинетическая энергия жидкости при  $\alpha$  -коэффициенте Кориолиса, учитывающем неравномерность распределения скоростей стока по высоте живого сечения;  $V$ — средняя скорость потока в данном живом сечении;  $v$ — фактическая скорость потока жидкости в данной точке живого сечения (см. рис.2.1).

Потенциальная валовая энергия водотока, теряемая на участке  $L_{1-2}$ , будет равна разности  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ , т.е.

$$\mathcal{E}_{1-2} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho g W \left[ \left( z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left( z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right) + \left( \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \right]. \quad (3)$$

Потенциальная валовая энергия водотока на участке 1-2 (при условии близко расположенных створов и равной скорости в начале и конце участков):

$$\mathcal{E}_{1-2} \cong \rho g W (\nabla_1 - \nabla_2) = \rho g W H_{1-2}, \quad (4)$$

где  $H_{1-2} = \nabla_1 - \nabla_2$  - удельная потенциальная энергия потока жидкости, называемая напором и численно равная падению уровней свободной поверхности водотока на участке  $L_{1-2}$ , а  $\nabla_1$  и  $\nabla_2$  - отметки уровней свободной поверхности водотока. В нашем случае  $H$  - напор является фактором интенсивности или показателем энергоемкости жидкости. Значение же  $W$  - фактор экстенсивности или количественный показатель потребления энергоресурса.

Разделив  $\mathcal{E}_{1-2}$  на  $T$  в секундах, получим среднюю мощность водотока  $N_{1-2}$  килограмм-сила-метр в секунду или в Вт:

$$N_{1-2} = \frac{\mathcal{E}_{1-2}}{T} = \rho g \frac{W}{T} H_{1-2} = \rho g Q_{1-2} H_{1-2}, \quad (5)$$

или, учитывая, что  $1 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{с} = 9,80665 \text{ Вт}$ , а  $\rho = 1000 \text{ кгс}/\text{м}$  получаем с округлением  $N_{1-2}$  в кВт при  $Q_{1-2}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  и  $H_{1-2}$ , м

$$N_{1-2} = 9,81 \cdot Q_{1-2} \cdot H_{1-2} \text{ в кВт}. \quad (6)$$

Если расчет гидроэнергетических ресурсов производится, как принято в гидроэнергетике для среднемноголетних условий, соответствующих обеспеченности 50% ( $p=50\%$ ), то величина валовой потенциальной энергии водотока  $\mathcal{E}_{1-2}^{вал}$  при его средней мощности  $N_{1-2}^{вал}$  будет равна:

$$\mathcal{E}_{1-2}^{вал} = 8760 \cdot \bar{N}_{1-2}^{вал}. \quad (7)$$

Так как величина расхода воды по длине участка обычно не постоянна, то для расчета  $\mathcal{E}_{1-2}^{вал}$  и  $N_{1-2}^{вал}$  используют обычно *метод линейного учета*, т.е. предполагают линейный характер изменения расхода вдоль участка. Это означает, что вместо  $Q_{1-2}$  следует подставлять  $\bar{Q}_{1-2}$ , равное

$$\bar{Q}_{1-2} = \frac{Q_1 + Q_2}{2}. \quad (8)$$

Из сказанного следует, что для расчета валовых гидроэнергетических ресурсов следует иметь значения  $H_{1-2}$  и  $Q_{1-2}$  для каждого участка водотока.

Во всех странах мира и в том числе России (и бывшем СССР) определение валового потенциала осуществляется методом линейного учета.

Для  $H_{1-2}$  практически это означает необходимость наличия продольного профиля водотока с указанием месторасположения расчетных створов и изменения уровней поверхностей воды по длине водотока, т.е.  $V = V(L)$ , где  $L$  - расстояние от некоторого начального створа, принятого за нуль отсчета. Расчет продольного профиля водотока и длины реки, как правило, проводятся с помощью топографических карт масштаба не менее 1:100000. Возможно использование при этом и голографических изображений земной поверхности, реализуемых с помощью космических средств или аэрофотосъемки.

Для определения расхода воды при наличии информации используются разные подходы:

1. на основе измеренных и обработанных данных прошлых наблюдений, если в этом створе есть водомерный пост;
2. по картам модулей стока  $m(L)$ ;
3. по картам осадков  $h_{oc}(L)$ .

При этом определение расходов должно производиться для обеспеченности 50%.

Используются карты масштаба 1:100000 с изолиниями модулей среднегодового стока  $m$  в [л/с·км<sup>2</sup>] в данном бассейне. С помощью таких же карт определяется и величина водосборной поверхности бассейна для каждого  $j$ -го створа, т.е.  $F_j(L_j)$  в км<sup>2</sup> и соответствующий ему модуль стока  $m_j(L_j)$ . В этом случае величина  $Q_j$  в м<sup>3</sup>/с определяется по формуле:

$$Q_j = m_j \cdot F_j \cdot 10^{-3}. \quad (9)$$

При использовании карт осадков, т.е.  $h_{oc}(L)$ , где обычно  $h_{oc}$  берутся в (мм/год) расчет  $Q_j$  в м<sup>3</sup>/с можно произвести по формуле:

$$Q_j = h_j \cdot F_j \cdot \frac{10^6}{3,6 \cdot 8760}. \quad (10)$$

В современных условиях для расчета  $V(L), Q(L)$  можно использовать геоинформационные системы (ГИС), в которых заложены снятые со спутников

топографические карты, на которые можно наложить карты с зависимостями  $m(\varphi, \psi)$  или  $h_{oc}(\varphi, \psi)$ , где  $\varphi, \psi$  - координаты точки: широта и долгота.

На основе вышеперечисленных расчетов строится *водно-энергетический кадастр реки (ВЭК)*:  $V(L)$ - изменение отметки дна по длине водотока;  $Q(L)$  - изменение расхода по длине водотока;  $N^{вал}(L)$ - изменение валовой мощности по длине водотока;  $i^N(L)$  – изменение удельной валовой мощности по длине водотока; валовой потенциал водотока  $N_{вал}$ .

В качестве исходной информации обычно для  $i$ -го участка считаются заданными:

- расходы 50% обеспеченности, соответствующие условиям средневодного года, для начала ( $Q_i$ ) и конца ( $Q_{i+1}$ ) для  $i$ -го участка;
- отметки сухого дна начала ( $V_i$ ) и конца ( $V_{i+1}$ ) створа для  $i$ -го участка.
- расстояние от начала реки до  $i$ -ого створа  $L_i$ .

*Расчет ведется при следующих допущениях:*

1. Расчёт ведётся методом линейного учёта, принятого на МИРЭК-1961 для всех стран мира, т.е. расход между створами меняется по линейному закону.
2. Принимается, что расходы реки в створах постоянны в течение года.
3. Принимается, что все требования участников ВХС и потери уже учтены в расходах и в расчётах не учитываются.

Расчет водно-энергетического кадастра открытого водотока производится по формулам (11)-(18) по методу «линейного учета».

Длина участка реки между створами:

$$l_{j,j-1} = L_j - L_{j-1} \quad [\text{км}] \quad (11)$$

Разница уровней на участке  $j-1 \div j$  реки:

$$H_{j,j-1} = V_{j-1} - V_j \quad [\text{м}] \quad (12)$$

Расход в створе водотока:

$$Q_j = m_j \cdot F_j \cdot 10^{-3}, \quad [\text{м}^3/\text{с}] \quad (13)$$

где  $m_j$  – модуль стока;  $F_j$  – площадь водосборной поверхности бассейна.

Средний расход воды на участке  $j-1 \div j$  реки:

$$\overline{Q}_{j,j-1} = \frac{Q_{j-1} + Q_j}{2} \quad [\text{м}^3/\text{с}] \quad (14)$$

Потенциальная мощность участка  $j-1 \div j$  реки:

$$\bar{N}_{j,j-1} = \frac{\bar{Q}_{j,j-1} \cdot H_{j,j-1}}{102} \quad [\text{МВт}] \quad (15)$$

Удельная потенциальная мощность участка  $j-1 \div j$  реки:

$$i_{j,j-1}^N = \frac{N_{j,j-1}}{l_{j,j-1}} \quad [\text{МВт/км}] \quad (16)$$

Полная валовая мощность:

$$\bar{N}_{\text{вал}} = \sum_{j=1}^{k0} \bar{N}_{j,j-1} \quad [\text{МВт}] \quad (17)$$

Полная валовая энергия:

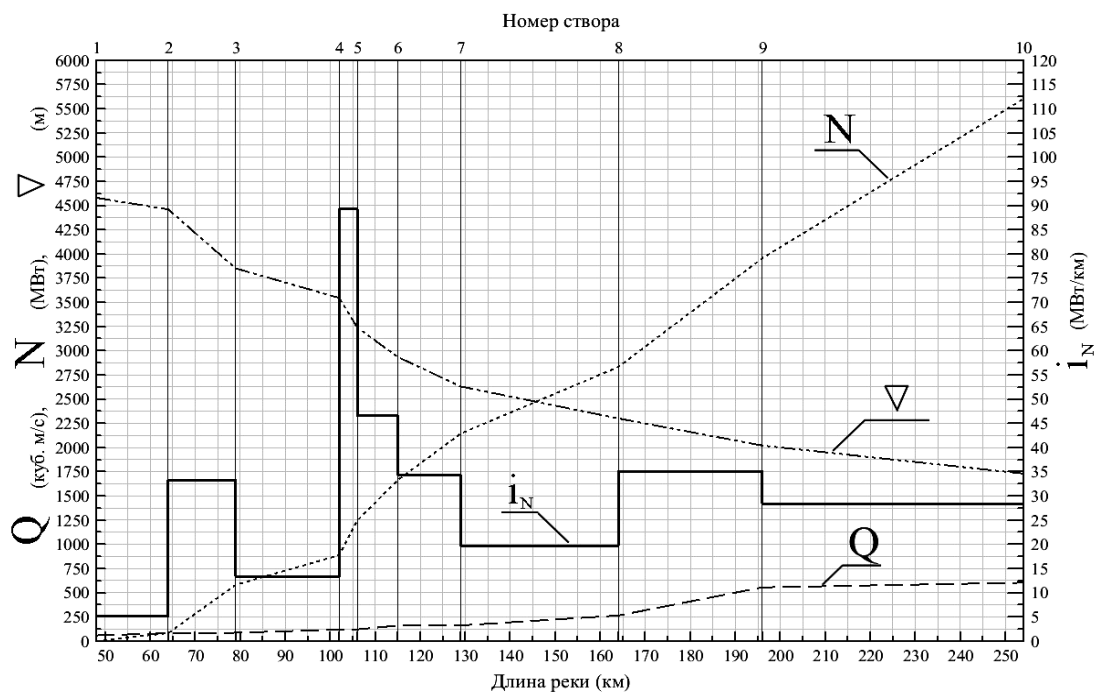
$$\mathcal{E}_{\text{вал}} = \bar{N}_{\text{вал}} \cdot 8760 \quad [\text{МВт} \cdot \text{ч/год}] \quad (18)$$

Все расчеты следует представлять в табличном виде (см.табл.1) и графическом виде (см.рис.2).

Таблица 1

Водноэнергетический кадастр водотока

Номер створа, $j$	$\nabla_j$ , м, — отметка уровня воды в створе $j$	$L_j$ , км, — расстояние от начального створа до створа $j$	$m_j$ , л/(с · км <sup>2</sup> ) — модуль стока в створе $j$	$F_j$ , км <sup>2</sup> , — площадь водосборной поверхности до створа $j$	$Q_j$ , м <sup>3</sup> /с, — расход воды в реке в створе $j$	$l_{j,j-1}$ , км, — длина расчетного участка реки между створами $j$ и $j-1$	$H_{j,j-1}$ , м, — разность уровней на участке водотока между створами $j$ и $j-1$	$\bar{Q}_{j,j-1}$ , м <sup>3</sup> /с, — средний расход воды на участке водотока между створами $j$ и $j-1$	$N_{j,j-1}$ , МВт, — потенциальная мощность на участке водотока между створами $j$ и $j-1$	$i_{j,j-1}^N$ , МВт/км, — удельная потенциальная мощность на участке водотока между створами $j$ и $j-1$	$N_j$ , МВт, — потенциальная мощность водотока до створа $j$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$\nabla_1$	$L_1$	$m_1$	$F_1$	$m_1 F_1 \cdot 10^{-3}$	$L_2 - L_1$	$\nabla_1 - \nabla_2$	$(Q_1 + Q_2)/2$	$N_{1,2}$	$i_{1,2}^N$	$N_1 = 0$
2	$\nabla_2$	$L_2$	$m_2$	$F_2$	$m_2 F_2 \cdot 10^{-3}$						$N_2 = N_{1,2} + N_1$
3	$\nabla_3$	$L_3$	$m_3$	$F_3$	$m_3 F_3 \cdot 10^{-3}$	$L_3 - L_2$	$\nabla_2 - \nabla_3$	$(Q_2 + Q_3)/2$	$N_{2,3}$	$i_{2,3}^N$	$N_3 = N_{2,3} + N_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$n-1$	$\nabla_{n-1}$	$L_{n-1}$	$m_{n-1}$	$F_{n-1}$	$m_{n-1} F_{n-1} \cdot 10^{-3}$	$L_n - L_{n-1}$	$\nabla_{n-1} - \nabla_n$	$(Q_{n-1} + Q_n)/2$	$N_{n-1,n}$	$i_{n-1,n}^N$	...
$n$	$\nabla_n$	$L_n$	$m_n$	$F_n$	$m_n F_n \cdot 10^{-3}$						$N_n = N_{n-1,n} + N_{n-1} = N^{\text{пот}}$

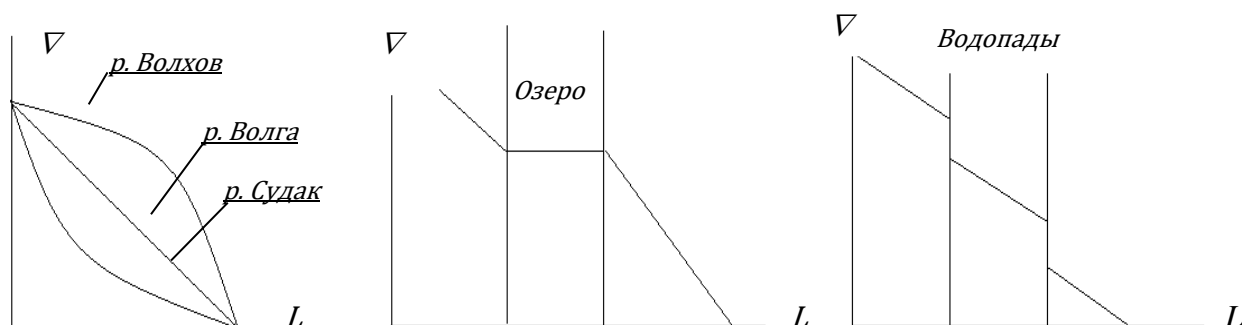


**Рис. 2.** Водноэнергетический кадастр водотока

Особенности зависимостей ВЭК:

1.  $\nabla(L)$ ,  $Q(L)$ ,  $N^{гал}(L)$  - кусочно-линейные функции;  $\nabla(L)$ -монотонно убывающие;  $Q(L)$  и  $N^{гал}(L)$ - монотонно возрастающие;
2.  $i^N(L)$ - кусочно-постоянная любого вида.

Водноэнергетический кадастр реки может существенно отличаться от представленного на рисунке 2, что связано с особенностями профиля реки (см.рис.3) или особенностями формирования расхода по длине реки (см.рис.4) .



**Рис.3 - Зависимости  $\nabla(L)$**



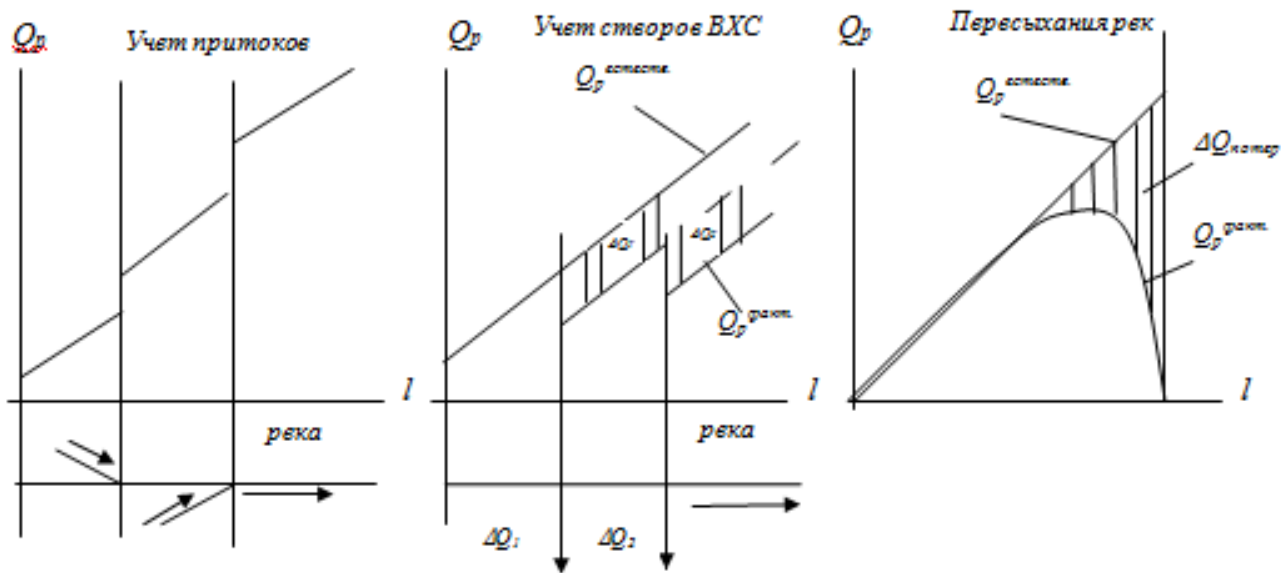


Рис.4 - Зависимости  $Q(L)$

## 1.2 Пример расчета валового гидроэнергетического потенциала открытого водотока и водно-энергетического кадастра реки

Дано: Рассматривается участок открытого водотока, который разбит на 5 створов ( $i=1, \dots, 5$ ). Исходная информация по створам представлена в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные по водотоку

Створ реки	$V_i$	$L_i$	$m_i$	$F_i$
I	м	км	м <sup>3</sup> /с	км <sup>2</sup>
1	2500	50	10	1000
2	2000	100	12	1500
3	1000	150	12,5	2000
4	500	200	14	2500
5	0	250	15	3000

Рассчитать:

1. Водноэнергетический кадастр водотока и представить его в графическом виде:  $V(L)$ ,  $Q(L)$ ,  $N(L)$ ,  $i^N(L)$ .

2. Валовой гидроэнергетический потенциал водотока

Расчет водноэнергетического кадастра рассматриваемого водотока производился по формулам (11)-(18) и представлен в табличном и графическом виде (см. табл. 3, рис. 4).

## Водноэнергетический кадастр водотока

$I$	$\nabla_i$	$L_i$	$m_i$	$F_i$	$Q_i$	$l_{i-i+1}$	$H_{i-i+1}$	$Q_{i-i+1}$	$N_{i-i+1}$	$N_i$	$i^N_{i-i+1}$
-	м	км	м <sup>3</sup> /с	км <sup>2</sup>	м <sup>3</sup> /с	км	м	м <sup>3</sup> /с	кВт	кВт	кВт/км
1	2500	50	10	1000	10	—	—	—	—	0	—
2	2000	100	12	1500	18	50	500	14	68,63	68,63	1,37
3	1000	150	13	2000	26	50	1000	22	215,69	284,31	2,16
4	500	200	14	2500	35	50	500	30,50	149,51	433,82	0,75
5	0	250	15	3000	45	50	500	40	196,08	629,90	0,33

Полная валовая мощность водотока составляет  $N^{\text{вал}} = 629,9$  МВт.

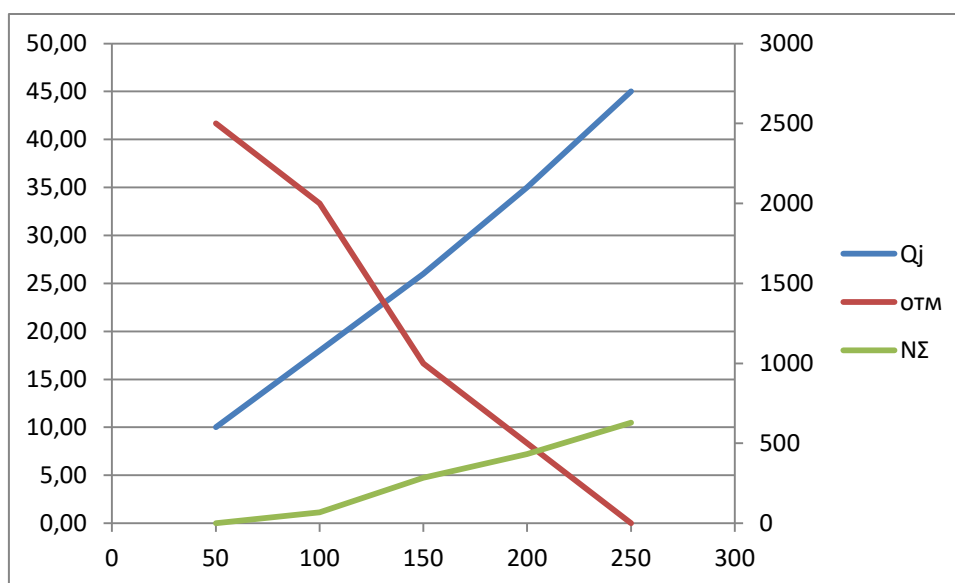


Рис. 4. Изменение  $Q(L)$  и  $\nabla(L)$